



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

MIKROSKOPICKÁ ANALÝZA DEFEKTŮ SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ

MICROSCOPIC ANALYSIS OF SILICON SOLAR CELLS DEFECTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAKUB BRUKNER

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

ING. RADEK STOJAN

BRNO,

2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Mikroelektronika a technologie

Student: Jakub Brukner
Ročník: 3

ID:134460
Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Mikroskopická analýza defektů solárních článků

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s různými měřicími metodami pro detekci defektů funkční struktury solárních křemíkových článků. Charakterizujte základní typy defektů mono a polykrystalického křemíku. Proveďte mikroskopickou analýzu tvaru defektů vybraných vzorků monokrystalického a polykrystalického křemíku. Na základě analyzovaných vzorků vytvořte souhrnný ucelený přehled charakterizující jednotlivé defekty.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího bakalářské práce.

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 6.6.2013

Vedoucí práce: Ing. Radek Stojan
Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT:

Tato bakalářská práce se zabývá detekcí defektů solárních článků pomocí elektroluminiscence, elektronového mikroskopu a následného 3D modelování defektních oblastí a struktury solárního článku. V textu jsou popsány základní metody pro detekci defektů vyskytujících se v solárních článcích. Také jsou zde popsány základní defekty, které se mohou objevit při jejich výrobě. Pro lepší orientaci je zde také popsán základní princip funkčnosti solárních článků a postup jejich výroby.

Klíčová slova:

solární článek, defekty, elektronový mikroskop, elektroluminiscence, 3D modelování

ABSTRACT:

This thesis deals with detection of defects solar cells using method electroluminescent, electron microscope and subsequent 3D modeling of areas with defects and structure of the solar cell. In the text are describe basic methods for detection of defects appearing in solar cells. Also some basic defects which can be made during manufacture are there describe. For better orientation the basic principle of functionality and manufacturing process is included.

Keywords:

solar cells, defects, electron microscope, electroluminescence, 3D modeling

Bibliografická citace díla:

BRUKNER, J. *Mikroskopická analýza defektů solárních článků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 41 s.
Vedoucí bakalářské práce Ing. Radek Stojan.

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářská práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené bakalářská práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této semestrální práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne:

.....

Poděkování:

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce, Ing. Radku Stojanovi, především za jeho trpělivost a ochotu, ale také, za metodické a cíleně orientované vedení a rady při plnění úkolů realizovaných v návaznosti na semestrální práci.

Obsah

1 Úvod.....	9
2 Popis funkčnosti solárního článku	10
3 Postup výroby solárních článků	12
3.1 Zpracování křemíku	12
3.2 Výroba solárních článků	15
4 Generační vývoj solárních článků.....	16
4.1 První generace.....	16
4.2 Druhá generace	16
4.3 Třetí generace	16
5 Materiály využívané pro výrobu solárních článků	17
5.1 Křemík (Si)	17
5.1.1 Monokrystalický křemík.....	17
5.1.2 Polykrystalický křemík	18
5.1.3 Multikrystalický křemík	18
5.1.4 Amorfni křemík	19
5.2 Arsenid galia (GaAs)	19
5.3 Materiály měď-indium-diselen	19
5.4 Telurid kademnatý (CdTe).....	20
5.5 Technologie CIGS (Copper – Indium – Gallium – Selenide)	20
5.6 Organické materiály.....	20
6 Defekty solárních článků	21
6.1.1 Vírový defekt (Swirl defects)	21
6.1.2 Nehomogenita difúzní vrstvy.....	22
6.1.3 Vnitřní pnutí.....	22
6.1.4 Mechanické poškrábání	23
6.1.5 Prachové částice.....	23
6.1.7 Špatné nakontaktování	24
6.2 Defekty křemíkové struktury	25
7 Metody měření defektů solárních článků.....	26
7.1 Metoda elektroluminiscence	26
7.2 Metoda fotoluminiscence.....	26
7.3 Luminiscence mikroplazmy.....	27

7.4 Metoda EBIC (Electron Beam-Induced Current)	27
7.5 Metoda LBIC (Light Beam Induced Current)	28
7.6 Metoda LBIV (Light Beam Induced Voltage).....	29
8 Praktická část	30
8.1 Měření metodou elektroluminiscence.....	30
8.2 Měření elektronovým mikroskopem.....	32
8.3 Modelování solárního článku.....	35
9 Závěr	38
Seznam obrázků	39
Literatura.....	40

1 Úvod

Spotřeba elektrické energie se za posledních padesát let ztrojnásobila a dá se předpokládat, že poptávka po elektrické energii nadále poroste. V dnešní době se stále hojně využívají fosilní paliva, kde převládá ropa, zemní plyn a uhlí. Fosilní paliva mají dvě hlavní nevýhody a to, že se jedná o neobnovitelné zdroje energie a jejich zásoby nám dříve nebo později zajisté dojdou a druhým neméně důležitým problémem je, že energie se z nich získává prostřednictvím jejich spalování a to má negativní dopady na čistotu ovzduší a životní prostředí.

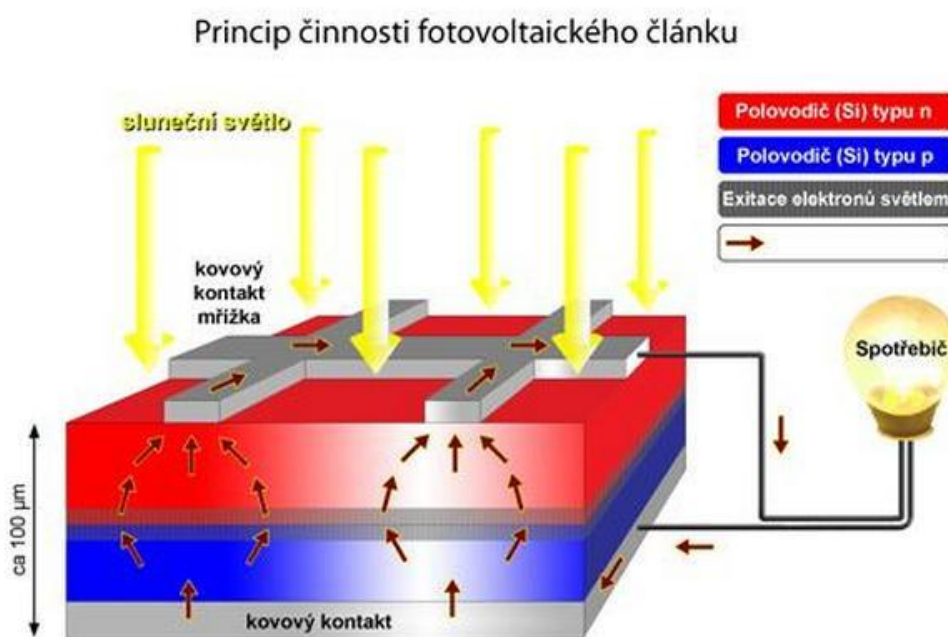
Z těchto důvodů by se mělo postupně přejít na jiné obnovitelné zdroje energie, jednou z možností je využívání energie sluneční. Solární energie je jedním z nejčistších a nejšetrnějších způsobů získávání elektrické energie, protože se jedná o přímou přeměnu slunečního záření na elektrickou energii. Oblast fotovoltaiky se za posledních několik let znatelně rozšířila, především kvůli tomu, že se jedná o levnou energii s brzkou návratností investice do několika let, a také kvůli dlouhé životnosti a odolnosti.

Naneštěstí u žádného výrobního procesu nemůžeme zaručit bezchybovost, ani výroba solárních článků není výjimkou. U solárních článků jsou tyto defekty značně nežádoucí, protože nám snižují jejich účinnost, takže je zapotřebí články analyzovat a při přítomnosti defektů je odstranit. Některé metody pro zjišťování přítomnosti defektů a popis defektů samotných jsou popsány v této práci.

Praktická část této bakalářské práce se rozděluje do tří bodů. Prvním bodem je prozkoumání monokrystalických a polykrystalických solárních článků za použití metody elektroluminiscence, dalším bodem je analyzování vybraného solárního článku elektronovým mikroskopem, poslední bod se zabývá vytvořením 3D modelů defektních oblastí.

2 Popis funkčnosti solárního článku

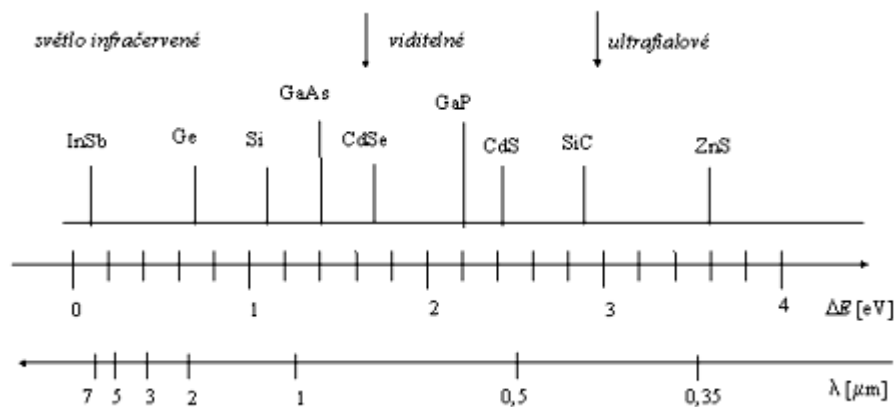
Solární článek pracuje na principu fotoelektrického jevu a můžeme si jej představit jako polovodičovou diodu, jejímž základem je polovodičový materiál s vodivostí P nebo N, nepoužívanějším materiálem pro výrobu je v současnosti křemík (Si). Pokud světelné záření –fotony- dopadnou na solární článek, tak je určitá část jejich energie polovodičem absorbována a vytvoří se pár elektron - díra. Každý foton s dostatkem energie nám vytvoří pár elektron - díra. Elektrony a díry jsou odděleny vnitřním elektrickým polem, toto rozdělení způsobí napěťový rozdíl mezi kontakty článku, napěťový rozdíl činí 0,5 - 0,6 V. Při připojení spotřebiče na kontakty článku, vznikne uzavřený elektrický obvod a elektrony, které se nahromadily v horní vrstvě, prochází přes spotřebič ke spodnímu kontaktu.[7]



Obrázek 1 Struktura solárního článku[18]

Pokud má světelné záření široký rozsah energie, tak část záření nebude mít dostatek energie pro vytvoření páru elektron - díra. Solární články mohou absorbovat jen určité množství energie z dopadajících fotonů, tato energie je dána polovodičovým materiálem použitým pro výrobu článku.

Při použití křemíkového materiálu je potřeba 1,1 eV pro vytvoření páru elektron - díra. Jestliže má foton více energie, tak potom tuto energii navíc nelze využít, a přeměňuje se na teplo. Pokud tato energie bude menší, tak nemůže být využita. Na následujícím obrázku je znázorněna vlnová délka světelného záření v μm , k tomu příslušná energie v eV a přiřazené nejpoužívanější polovodičové materiály.



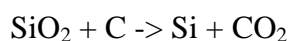
Obrázek 2 Šířka zakázaných pásů v eV vybraných polovodičů a vlnová délka odpovídajícím těmto energiím[13]

3 Postup výroby solárních článků

Nejrozšířenější fotovoltaické články jsou na bázi křemíku (monokrystalický, polykrystalický). Křemík se využívá, protože má mnoho výhod, např. je jedním z nejrozšířenějších prvků v zemské kůře. Další výhody mohou spočívat v jeho snadné dostupnosti, netoxicitě nebo už pouze v tom že je nejlépe prozkoumaným polovodičem.

3.1 Zpracování křemíku

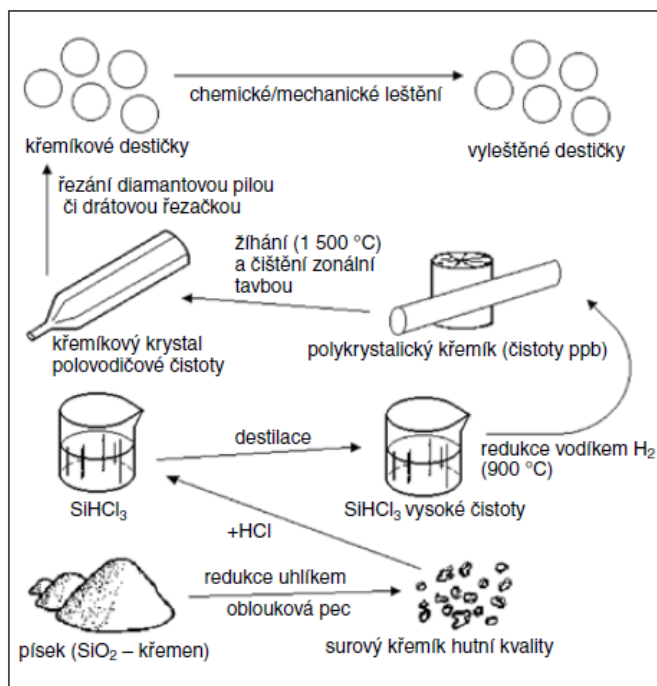
Surový křemík se vyrábí z písku redukcí uhlíkem v obloukové peci, při procesu dochází k celému řetězci chemických reakcí. Pokud bychom celý proces zjednodušili a počítali pouze výchozí a konečný produkt, tak by nám jej mohla vyjádřit jediná rovnice:



V obloukové peci se smíchá písek s mletým karbonizovaným uhlím (koksem). Na dně pece, kde je teplota asi 2000 °C, se hromadí roztavený křemík, který se v pravidelných intervalech odlévá. Křemík získaný tímto způsobem má čistotu 99%, zbylé 1% tvoří příměsi železa, hliníku a uhlíku. Aby byl křemík připraven k použití v polovodičové technice, je zapotřebí aby měl mnohem větší čistotu, proto je třeba křemík ještě vyčistit. Další čištění může probíhat převodem křemíku do kapalného skupenství a vyčištěním následnou destilací, tímto způsobem se dosáhne koncentrace nečistot řádově 10^{-9} . Takový křemík je vhodný k výrobě integrovaných obvodů. Pro výrobu fotovoltaických článků stačí nižší koncentrace nečistot, a to 10^{-6} .
[3][17]

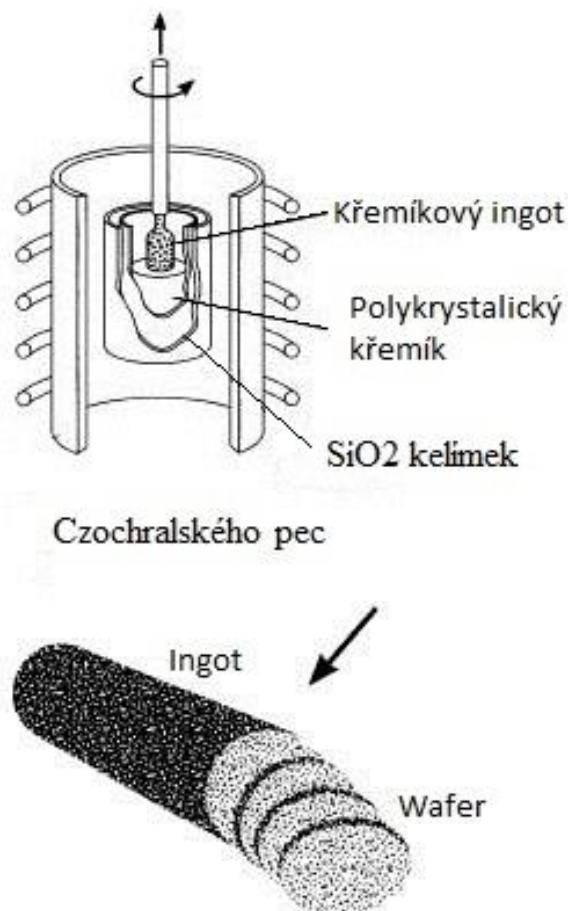
Po dokončení čištění je nutné z polotovarů vytvořit polykrystalické nebo monokrystalické ingoty.

Výroba polykrystalických ingotů začíná roztavením křemíku a následným nalitím do formy, kde se nechá pomalu chladnout, aby nedocházelo k vytváření nežádoucích defektů. Samotný proces chladnutí je řízený induktivním ohřevem, aby se vytvořila monokrystalická zrna, která by měla být co největší.



Obrázek 3 Schematické znázornění postupu výroby křemíku[3]

Monokrystalický ingot se vyrábí tzv. Czochralského metodou, která spočívá ve vytahování roztaveného křemíku krouživým pohybem. Při této metodě je do křemenného kelímku vložen polykrystalický křemík a požadovaná příměs, která nám pomůže k vytvoření monokrystalu typu P nebo N. [3][17]



Obrázek 4 Znáznornění Czochralského pece a výsledného ingotu[19]

Povrchu roztaveného křemíku se následně dotkne zárodek monokrystalického křemíku, který je upevněn na rotující závěsné tyči. Růst nastává při vytahování zárodku, vytahování je velice pomalé. Přitom dochází k postupnému ochlazování. Během chlazení se atomy z vrstvičky na zárodku postupně orientují do krystalové struktury zárodečného monokrystalu.[3][7]

3.2 Výroba solárních článků

Počátečním materiálem pro výrobu solárních článků z krystalického křemíku jsou křemíkové destičky čtvercového tvaru. Monokrystalické nebo multikrystalické ingoty musejí být rozřezány na destičky o tloušťce cca 0,2–0,3 mm, povrch destiček zhmožděný řezáním musí být odleptán. Příprava destiček rozřezáním ingotu je relativně nákladná operace, při které je znehodnoceno téměř 50 % materiálu ingotu.

Z jedné křemíkové destičky je vyroben jeden solární článek. Po chemickém opracování (leptání, texturace, čištění) je jednostranně vytvořen přechod PN difuzí fosforu ve vzdálenosti 0,2–0,5 μm od povrchu. Po odstranění fosfor silikátového skla vzniklého při difúzi je povrch pokryt antireflexní vrstvou (SiN_x nebo TiO_2), která minimalizuje odraz, aby maximum fotonů mohlo proniknout až do oblasti přechodu PN.

Po nanesení antireflexní vrstvy se vytvoří kontakty sběrnice, obvykle pomocí vodivých past nanesených na povrch článků sítotiskem. Na straně s přechodem PN (na vrstvu N^+) je sítotiskem nanесena sběrnice, ve tvaru mřížky nebo hřebínku, aby zakrýval co nejmenší část plochy, a na zadní stranu je sítotiskem nanесen kontakt, který bývá celoplošný. Po vyschnutí pasty následuje vypálení, při kterém dojde k rozrušení antireflexní nitridové vrstvy a vytvoření ohmických kontaktů.[3][7]

4 Generační vývoj solárních článků

4.1 První generace

Dnes nejpoužívanější fotovoltaické články využívají jako základ křemíkové desky. Tyto články dosahují poměrně vysoké účinnosti kolem 17%, ale mají tu nevýhodu, že jejich pořizovací náklady jsou vysoké. [1][4]

4.2 Druhá generace

Druhá generace článků se převážně snaží o snížení výrobních nákladů pomocí snížení materiálové náročnosti a menším počtem technologických kroků. Tato generace se vyznačuje až 1000 krát tenčí aktivní absorbní polovodičovou vrstvou (thin-film), mezi hlavní představitele této generace patří např. články z amorfního křemíku nebo CIGS (Copper – Indium – Gallium – Selenide) články. Nevýhodou těchto článků je menší účinnost (10%) a kratší životnost.[1][4]

4.3 Třetí generace

Články třetí generace se snaží o zvýšení počtu absorbovaných fotonů a následně generovaných párů elektron - díra a o intenzivnější přijímání energie z dopadajících fotonů. Nejvýznamnějším typem ve třetí skupině jsou články dvojvrstvé a vícevrstvé, protože každý z článků absorbuje určitou část spektra a energetické využití se zvyšuje. Výsledné napětí vícevrstvého článků je dáno součtem napětí jednotlivých článků. [1][4]

5 Materiály využívané pro výrobu solárních článků

5.1 Křemík (Si)

Křemík je nejpoužívanějším materiálem při výrobě solárních článků. Je vhodný, protože je ho v zemské kůře dostatek a je dobře zvládnuta technologie úpravy křemíku pro elektrotechnické aplikace, což se projevuje i v pořizovacích nákladech. Taktéž je vhodný z hlediska šířky zakázaného pásu $\approx 1,12$ eV. Křemík pro výrobu solárních článků může být monokrystalický, polykrystalický nebo amorfní.

5.1.1 Monokrystalický křemík

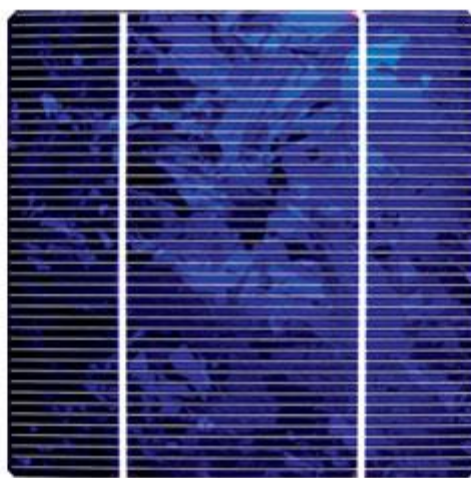
Monokrystalický křemík je křemík který má jednotnou krystalickou strukturu. Je vyráběn za pomoci Czochralského metody tažením z kelímku. Solární články vyrobené z monokrystalického křemíku dosahují při přímém ozáření slunečními paprsky větší účinnosti než polykrystalický, jejich účinnost dosahuje 13-18%, takže jsou vhodnější tam, kde je potřeba vyšších výkonů. Získání monokrystalického křemíku je ovšem nákladnější.



Obrázek 5 Ukázka monokrystalického článku

5.1.2 Polykrystalický křemík

Polykrystalický článek má menší účinnost než monokrystalický, a to 12-15%, ale narozdíl od monokrystalického dokáže lépe zpracovat rozptýlené světlo, je proto vhodný pro aplikace s menšími výkony. U polykrystalických článků je horký křemík odléván do formy a pozvolna ochlazován. V průběhu tuhnutí dochází k tvorbě různě velkých a rozdílně orientovaných krystalů, což dodává článkům charakteristickou polykrystalickou strukturu.



Obrázek 6 Ukázka polykrystalického článku

5.1.3 Multikrystalický křemík

Multikrystalické články tvoří více jak 50% z celkového počtu křemíkových článků a jsou stále na vzestupu. Multikrystalický křemík je pro výrobu jednodušší a levnější než křemík monokrystalický, protože je vyráběn z méně kvalitního křemíku, který se nevyužil v mikroelektronické oblasti, avšak to nemá na kvalitu jejich zpracování takový vliv, jako u monokrystalických které jsou vyráběny Czochralského metodou. Přesto dosahují účinnosti 12 - 14%. Aby nevznikaly ztráty při přechodu elektronů rozhraním mezi krystaly, jsou snahy vyrábět multikrystaly s krystaly co největšími, účinnost tohoto materiálu je možné zvýšit chemickou úpravou.

5.1.4 Amorfni křemík

U amorfniho křemíku se energetická mezera mezi vodivostním a valenčním pásem využívá jiným způsobem, než je tomu u krystalického, tato mezera se nazývá pohyblivostí mezera. Šířka pohyblivosti mezery je 1,7 eV (to odpovídá vlnové délce 730nm). U amorfniích článků je elektrický proud generován v tenké napařené vrstvě křemíku a dalších kovů. Účinnost těchto článků je výrazně nižší – pouhých 5% - 10%, po uvedení do provozu dochází k rychlejšímu poklesu výkonu (po cca 100 hodinách osvětlení dochází k poklesu o 20% a po téměř roce dochází k dalšímu poklesu o 10%) oproti mono- a polykrystalickým článkům. Amorfni články jsou oproti klasickým levnější, pro stejný instalovaný výkon je však potřeba přibližně dvojnásobná plocha.[9]

5.2 Arsenid galia (GaAs)

Dnes druhým nejčastěji využívaným materiálem pro výrobu článků je arsenid galia. Arsenid galia se zatím při výrobě článku uplatňuje méně než křemík, hlavním důvodem je, že je podstatně dražší. Dále oproti křemíku má více jak dvojnásobnou hustotu, takže nevynikají z hlediska měrného výkonu, tuto nevýhodu můžeme odstranit výrobou velmi tenkých článků.

Solární články vyrobené z GaAs mají takéž mnoho předností, mezi ty nejdůležitější patří jejich větší účinnost než u křemíkových článků. Tyto články jsou také daleko vhodnější do míst se zvýšenou teplotou.

5.3 Materiály měď-indium-diselen

Materiály měď-indium-diselen a měď-indium-galium-selen jsou polykrystalické polovodiče s přímým přechodem a s vysokou hodnotou optického absorpčního koeficientu. Tyto materiály jsou polovodiče p - typu, jako n - typ se často využívá kadmium síry.

5.4 Telurid kademnatý (CdTe)

Telurid kademnatý je velmi nadějným materiálem pro přeměnu solární energie pro jeho vlastnosti a především kvůli skoro ideální šířce zakázaného pásu (1,44eV) a velkému činiteli absorpce. Jedním z problému CdTe je, že p - typ tohoto polovodiče má vysokou rezistivitu, a to vede k velkým ztrátám. Jednou z možností jak toto obejít je přidáním CdTe bez příměsí (P nebo N) mezi CdTe s příměsí N a teluridem zinku (ZnTe) s vodivostí P. Tento materiál nelze využít pro masivní nasazení, např. v slunečních elektrárnách, protože ho v zemské kůře není dostatečné množství, avšak je možnost využít ho u menších aplikací, do kalkulačků a podobně. V laboratorních podmínkách lze dosáhnout účinnosti 16 %. [9]

5.5 Technologie CIGS (Copper – Indium – Gallium – Selenide)

Tento článek se vyrábí z mědi, india, galia a selenidu metodou naprašování na skleněný substrát. Výhodami tohoto článku jsou nízké výrobní náklady a vysoká účinnost, která dosahuje až 20%, a téměř také nepodléhají degradaci světlem. Avšak mají jednu značnou nevýhodu, pro výrobu je nutné užití india, a to je vzácný prvek, kterého je nedostatek. [9]

5.6 Organické materiály

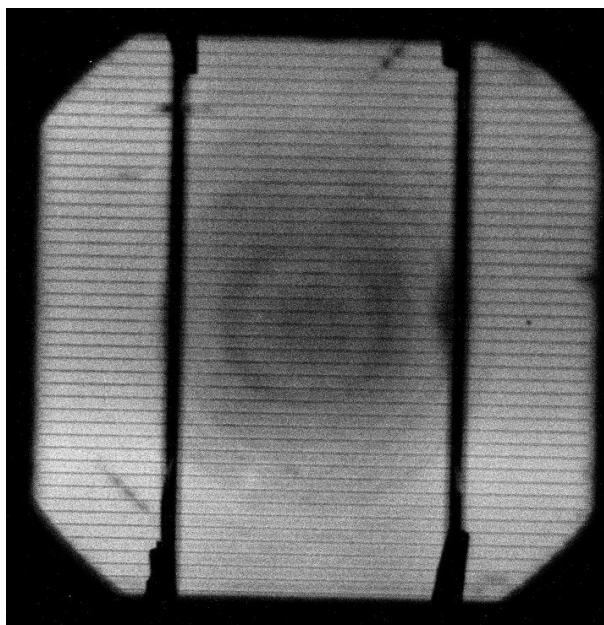
Anorganické materiály nejsou jediné, které se dají při výrobě solárních článků využít, pro výrobu se dají využít i organické materiály. Výhodou organických materiálů by mohla být jejich levnější výroba než u současných anorganických. V posledních letech jejich účinnost znatelně vzrostla, v laboratorních podmínkách dosahuje více jak 5%. Hlavním problémem organických solárních článků je jejich rychlá degradace. Po 1000 hodinách osvětlení u těchto článků klesá účinnost o 10%. [9]

6 Defekty solárních článků

Jakékoliv vady jsou ve fotovoltaických článcích vysoce nežádoucí z důvodu snižování jejich účinnosti. Defekty solárních článků se dají dále rozdělit na dvě hlavní skupiny. První jsou materiálové defekty, které vznikají již při výrobě křemíku. Další skupinou jsou tzv. procesní defekty, ty nám vznikají při výrobě samotných solárních článků tím, že s nimi nešetrně zachází.

6.1.1 Vírový defekt (Swirl defects)

Na první pohled nejpatrnější defekt je vírový defekt. Tento defekt je charakteristický svým tvarem, a to kružnicemi vycházejícími od středu solárního článku, a má velice nepříznivý dopad na fungování solárního článku. Tyto kružnice vznikají při vnikání nežádoucího kyslíku při tažení ingotu za použití Czochralského metody.[16]



Obrázek 7 Vírový defekt

6.1.2 Nehomogenita difúzní vrstvy

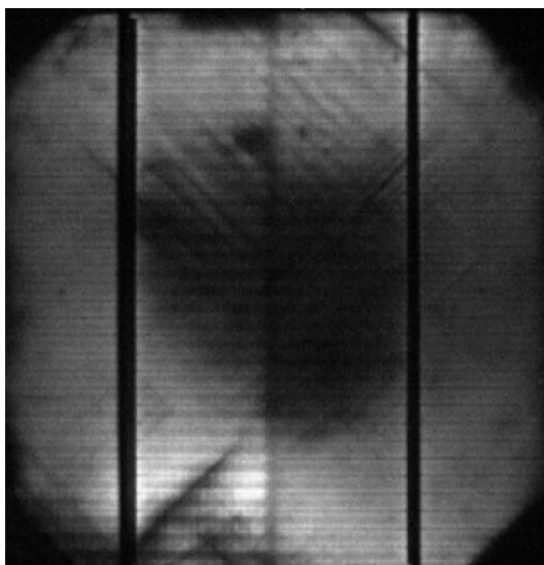
Tento typ defektu se řadí do kategorie procesních defektů.



Obrázek 8 Nehomogenita difúzní vrstvy[11]

6.1.3 Vnitřní pnutí

Defekt vzniká při tažení monokrystalu křemíku např. za použití Czochralského metody. Tento defekt je způsoben špatným řízením taženého ingotu.



Obrázek 9 Vnitřní pnutí[11]

6.1.4 Mechanické poškrábání

Může vzniknout při nešetrném zacházení se solárním článkem.



Obrázek 10 Mechanické poškrábání[11]

6.1.5 Prachové částice

Při difúzi dojde k zatavení prachových částic do základního materiálu.



Obrázek 11 Prachové částice[11]

6.1.7 Špatné nakontaktování

Pro tento defekt se nemusí využívat žádného měření, protože je patrný na první pohled i pouhým okem. Tento defekt vzniká při nanášení kontaktů za pomoci síťotisku.



Obrázek 12 Špatné nakontaktování[11]

6.2 Defekty křemíkové struktury

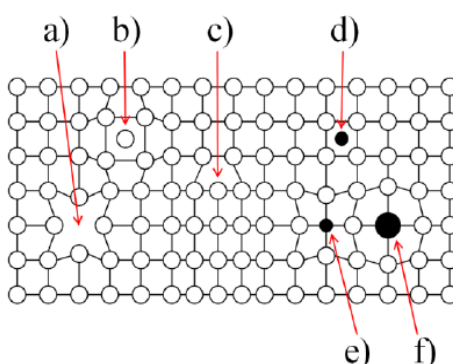
Tyto defekty mohou vznikat při tažení monokrystalického křemíku za použití Czochralského metody. Křemíkové struktury mohou obsahovat tyto chyby:

Bodové defekty – vakance, intersticiální nečistoty

Čárové defekty – hranové dislokace, dislokační smyčky

Plošné defekty – vrstvené chyby

Objemové defekty – shluky bodových defektů



Obrázek 13 a) Vakance, b) vlastní intersticiální atom, c) hranová dislokace, d) intersticiální příměsový atom, e) substituční atom s menším poloměrem, f) substituční atom s větším poloměrem

Vakance i intersticiály jsou tzv. rovnovážné poruchy, což znamená, že při každé teplotě se ustálí jejich rovnovážná koncentrace. Za určitých podmínek je možno koncentraci těchto poruch zvýšit nad rovnovážnou hodnotu. Děje se tak např. rychlým ochlazením materiálu z vysoké teploty.

Intersticiální příměsi vznikají vmezením atomu příměsi do dutin mezi atomy základního materiálu. Tyto poruchy vznikají, jestliže je atom příměsi výrazně menší v porovnání s atomem základního materiálu.

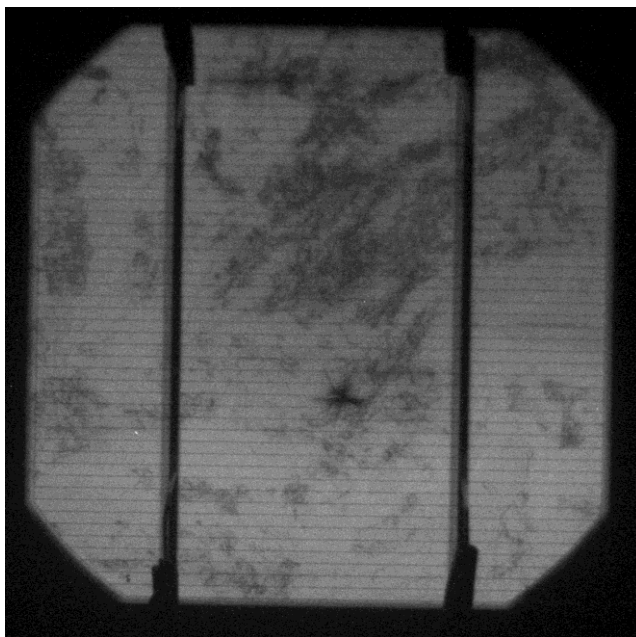
Substituční atomy – jsou atomy, které v mřížce nahrazují původní atom. Okolní atomy jsou ovlivněny napětovým polem.

Hranová dislokace se vyznačuje stlačenou částí krystalu podél jedné krystalografické roviny o jeden mřížkový parametr nebo vsunutou přebytečnou rovinou do neporušené části krystalové mřížky.

7 Metody měření defektů solárních článků

7.1 Metoda elektroluminiscence

Při analýze článků za pomoci elektroluminiscence jsou solární články zapojeny jako LED diody a dochází k emitování záření světla v důsledku rekombinace. Vyzařované záření má vlnovou délku závislou na použitém materiálu, pro Si se vyzařované záření nachází v IR spektru. Toto záření můžeme snímat pomocí CCD kamery s příslušným filtrem. Články je nutné umístit do tmavého prostředí, aby nedocházelo ke zkreslení výsledků. Výsledné obrazy z elektroluminiscence jsou černobílé a zobrazují nám proudovou hustotu článku, kde tmavá místa ukazují malou hustotu, což může znamenat přítomnost vad v článku. Metoda elektroluminiscence pomáhá odhalit defekty, které nejsou rozeznatelné pouhým okem. [14]



Obrázek 14 Výsledný obraz elektroluminiscence

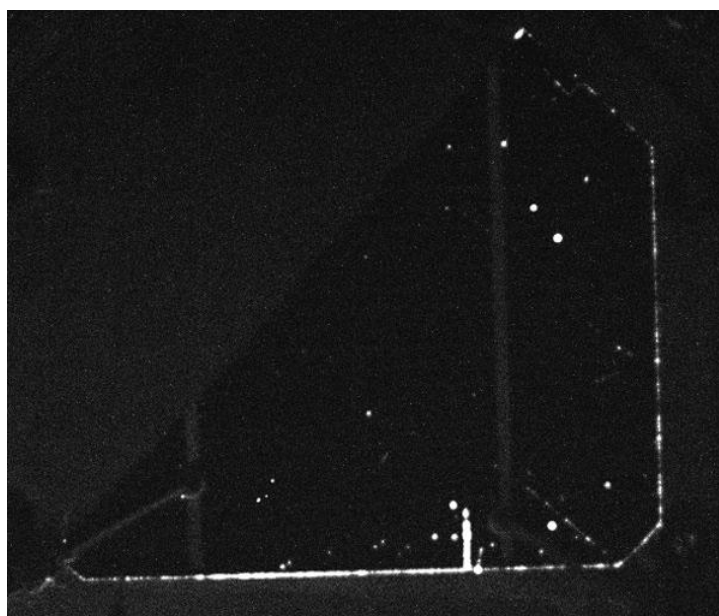
7.2 Metoda fotoluminiscence

Měření pomocí metody fotoluminiscence je do značné míry podobné předešlé metodě s tím rozdílem, že při této metodě není solární článek napájen, ale je buzen vnějším zdrojem světelného záření a opět je článek snímán CCD kamerou. Této metody se využívá při velkovýrobě článků díky její rychlosti.

7.3 Luminiscence mikroplazmy

Tato metoda měření je podobná metodě elektroluminiscence, avšak při této metodě je článek zapojen v závěrném směru a napětí, které se vytvoří v závěrném směru, a je důvodem vzniku mikroplazmy.

Při vzniku mikroplazmy dochází ke zvyšování teploty v daném místě a může dojít k PN průrazu a tím zničení solárního článku. Mikroplazma vzniká v místech, kde jsou poruchy křemíku. Záření mikroplazmy je opět možné zachytit CCD kamerou. Tato metoda je vhodná pro odhalení nehomogenity difúzní vrstvy.[15]

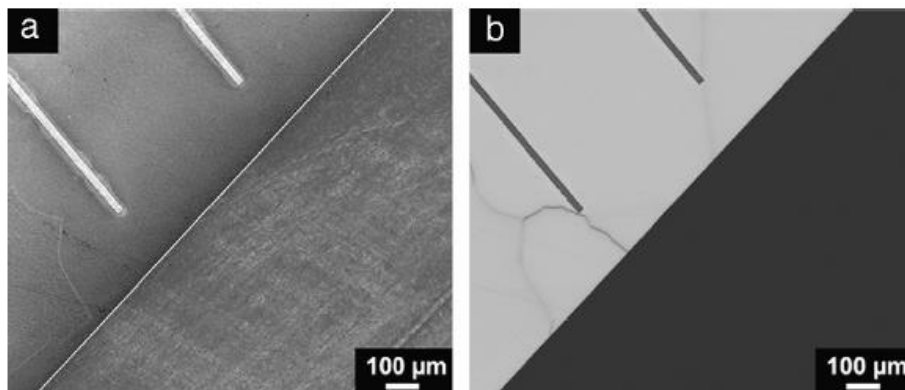


Obrázek 15 Vyzařování mikroplazmy[15]

7.4 Metoda EBIC (Electron Beam-Induced Current)

Metoda EBIC se dá využít k výrobě 2D map k prozkoumání homogenity solárních článků. Tyto mapy jsou získány skenováním elektronového paprsku za použití elektronového rastrovacího mikroskopu, na malé ploše a pomocí programu se solární článek pohybuje pod paprskem.

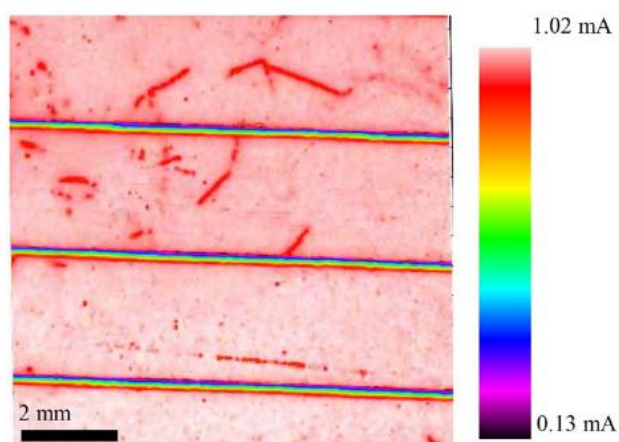
Elektronový paprsek vytváří pár elektron - díra v solárním článku podobně jako světlo při normálním provozu článku. Z Obrázek 16 je patrné, že detektor EBIC odhalí vady schované ve struktuře článku.[2][14]



Obrázek 16 Výsledný obraz elektronového mikroskopu za použití a) SE detektoru, b) EBIC detektoru[2]

7.5 Metoda LBIC (Light Beam Induced Current)

Při této metodě je solární článek zapojen v propustném směru. Tato metoda využívá světelného paprsku, který je zaostřen na solární článek, a za pomoci proudové odezvy se získá XY charakteristika rozložení proudu. Z naměřených dat můžeme sestavit proudové mapy a tím určit většinu lokálních defektů. Jako zdroj světla pro tuto metodu se využívá LED nebo laseru. Velkou výhodou u LED i laseru je, že můžeme využít různé vlnové délky, a tím jsme schopni dosáhnout přesnějších informací. Naopak značnou nevýhodou je velká časová náročnost při použití této metody.



Obrázek 17 Výsledný obraz metody LBIC[20]

7.6 Metoda LBIV (Light Beam Induced Voltage)

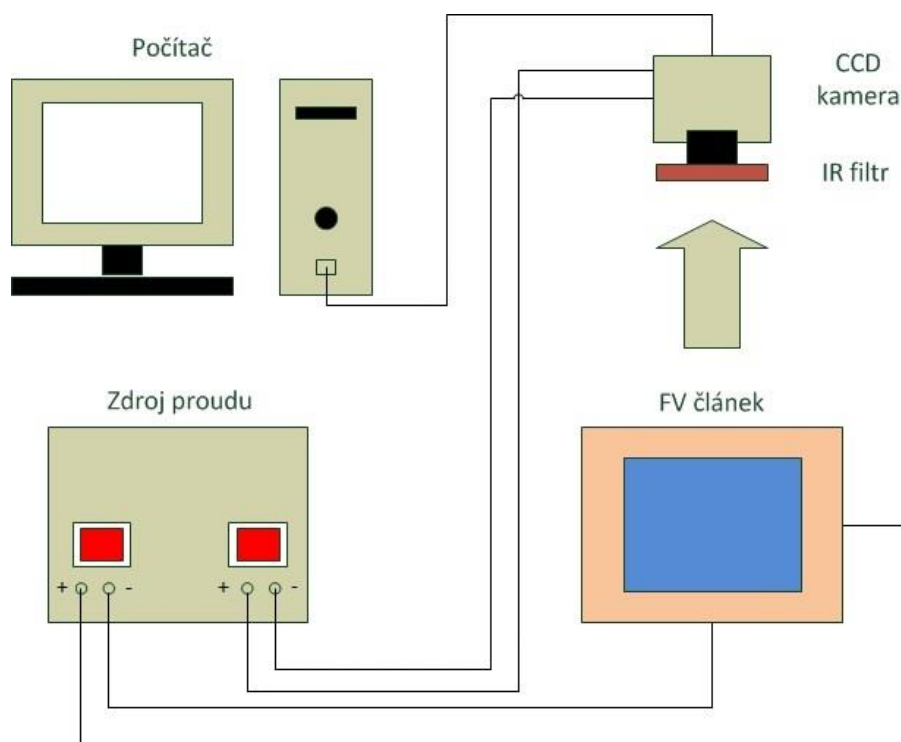
Metoda LBIV je do značné míry podobná metodě LBIC, ale liší se v tom, že se místo proudu snímá napětí.

8 Praktická část

Praktická část je rozdělena na několik částí, v první proběhla analýza vybraných solárních článků za pomoci měřicí metody elektroluminiscence, v následující části byl vybraný solární článek (označen Z12047 SiD 23) analyzován elektronovým mikroskopem. Poslední část byla zaměřena na modelování 3D obrazů s využitím snímků naměřených pořízených elektronovým mikroskopem.

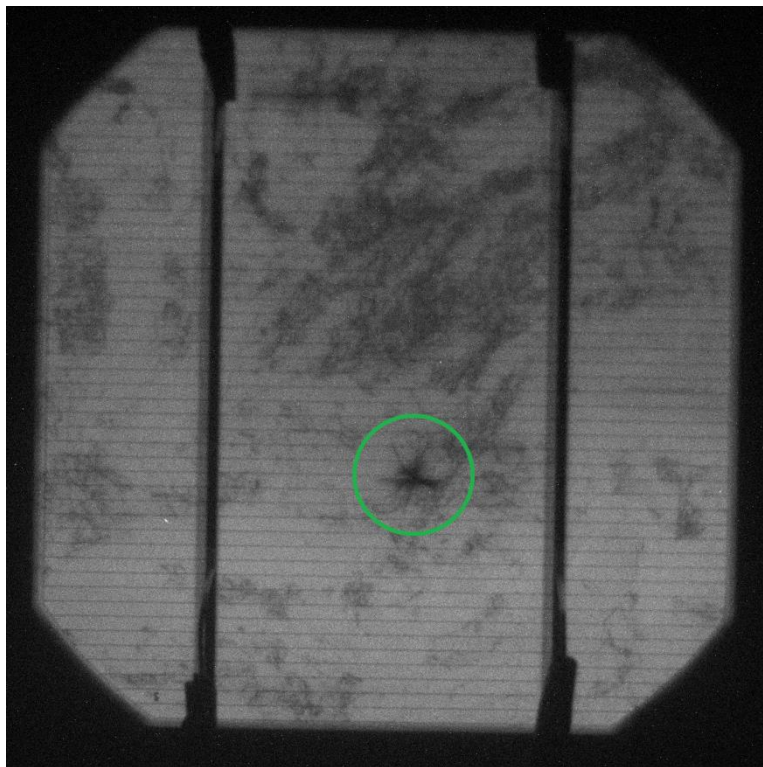
8.1 Měření metodou elektroluminiscence

Metodou elektroluminiscence bylo analyzováno celkem patnáct polykrystalických solárních článků, lišící se různou tloušťkou reflexní vrstvy. Měřicí pracoviště je tvořeno temnou komorou, CCD kamerou, zdrojem proudu pro napájení článků a počítače s příslušným programem. Na obrázku č. 18 je schématicky znázorněno zapojení pro metodu elektroluminiscence.



Obrázek 18 Schématické zapojení pro měření metodou elektroluminiscence

Měřený článek se v průběhu měření nachází v temné komoře, aby naměřené výsledky byly odstíněny od nežádoucích zdrojů světelného záření. K pořízení snímků byla využita CCD kamera G2-3200 od firmy Kodak, s čipem KAF-3200ME. Tato kamera je pro snímání článků vhodná, protože se vyznačuje nízkým tepelným šumem, avšak musí se opatřit IR filtrem, protože z článku je vyzařováno záření v oblasti IR spektra. Měřené články byly napájeny napětím $\pm 1,5\text{V}$ a odebíraly proud 2A.



Obrázek 19 Vzorek 3801 SiD 2

Na obrázku č. 19 je ukázka výsledného snímku. Na tomto snímku je kroužkem označeno místo s defektem. Tento defekt může být způsoben velkým pnutím v materiálu, např. vysokým tlakem na dané místo.

8.2 Měření elektronovým mikroskopem

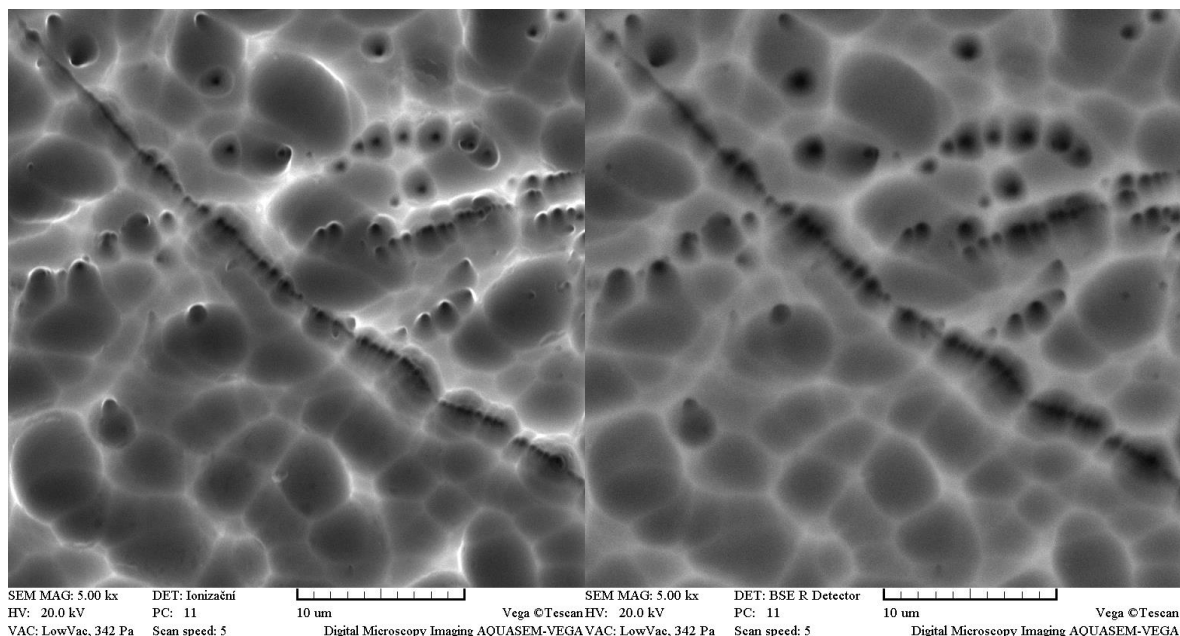
Měření probíhalo v Ústavu přístrojové techniky AV ČR, měřilo se na rastrovacím elektronovém mikroskopu Aquasem II, který byl upraven pro environmentální použití. Pro měření se využily detektory SE (secondary electron), detektor SE zachytává sekundární elektrony, a BSE (Backscattered Electron, detektor) pro zachytnutí zpětně odražených elektronů.



Obrázek 20 Měřící stanoviště[21]

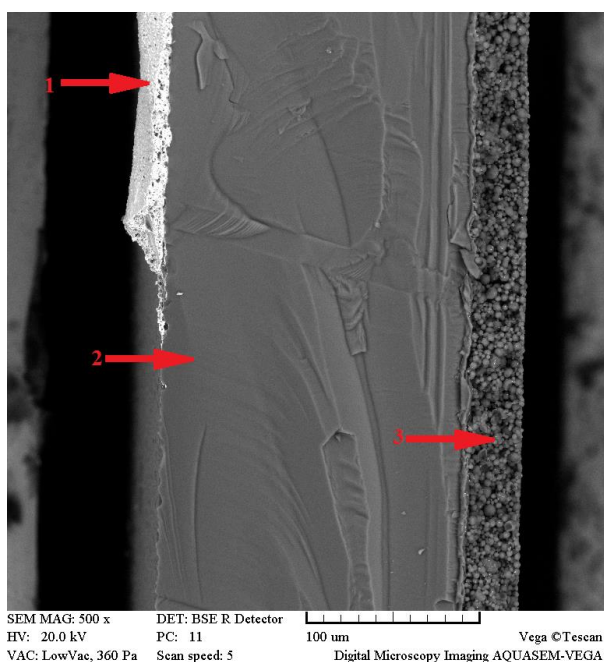
SE detektor se využívá pro zachytávání sekundárních elektronů, tyto elektrony vznikají při vnikání primárního elektronového svazku do zkoumaného objektu a vznikají v důsledku srážek elektronů. Za sekundární elektrony můžeme považovat elektrony, které mají menší energii než 50 eV, nejčastěji však mají 3-5 eV. Sekundární elektrony jsou nejvhodnější pro zjištění povrchu vzorku.

BSE detektor zachytává zpětně odražené elektrony. Zachycené elektrony mají při odrazu ze vzorku energii větší, než 50 eV. Tento detektor se využívá pro zjištění materiálu látek, protože stejný materiál vykazuje stejnou hloubku světlosti, lze tohoto využít pro zjištění stejného materiálu v látce, avšak existují i různé materiály se stejnou hloubkou světlosti.



Obrázek 21 Pnutí materiálu, SE a BSE detektor, zvětšení 5000x

Na obrázku č. 21 je zobrazeno pnutí v materiálu, které je způsobeno velkým mechanickým namáháním solárního článku, a také je možné pozorovat topologii povrchu. Pnutí je znázorněno vystouplou černou linií a pomocí černých bodů. Taktéž na tomto obrázku můžeme vidět patrný rozdíl mezi SE a BSE detektory.

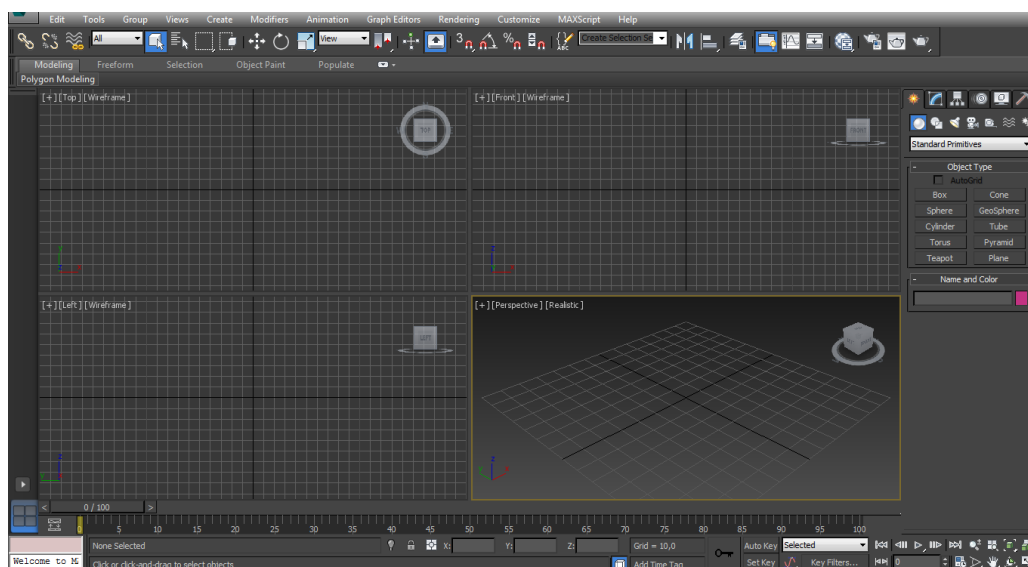


Obrázek 22 Průřez článkem, BSE detektor, zvětšení 500x

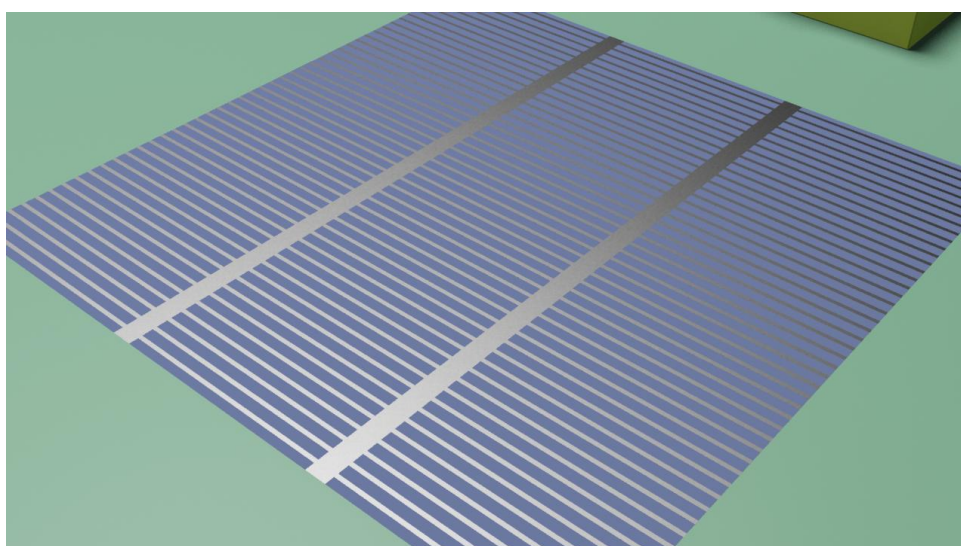
Na obrázku č. 22 můžeme pozorovat průřez solárním článkem. Pomocí tohoto obrázku můžeme v průřezu sledovat tři různé materiály. Ukazatel číslo jedna poukazuje na metalizaci, která má tloušťku 20 μm , uprostřed, bod č. 2 je křemíková vrstva široká 180 μm , poslední bod č. 3 ukazuje na zadní metalizace, která je široká 30 μm .

8.3 Modelování solárního článku

Pro modelování byl využit profesionální program pro vytváření 3D grafiky 3ds Max 2012 od firmy Autodesk. Tento program lze využívat v mnoha odvětvích od architektury přes stavební inženýrství až k různým 3D vizualizacím, na obrázek č.23 je možnost vidět uživatelské prostředí programu.



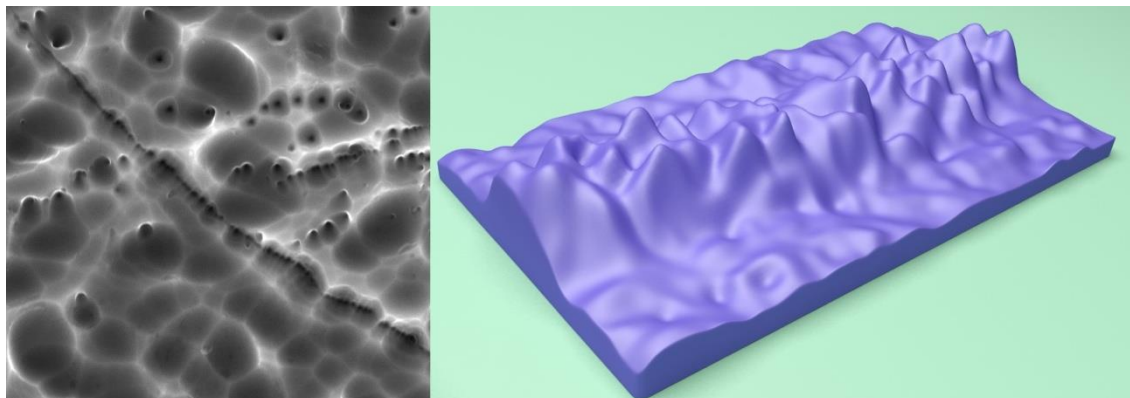
Obrázek 23 Uživatelské rozhraní programu 3ds Max



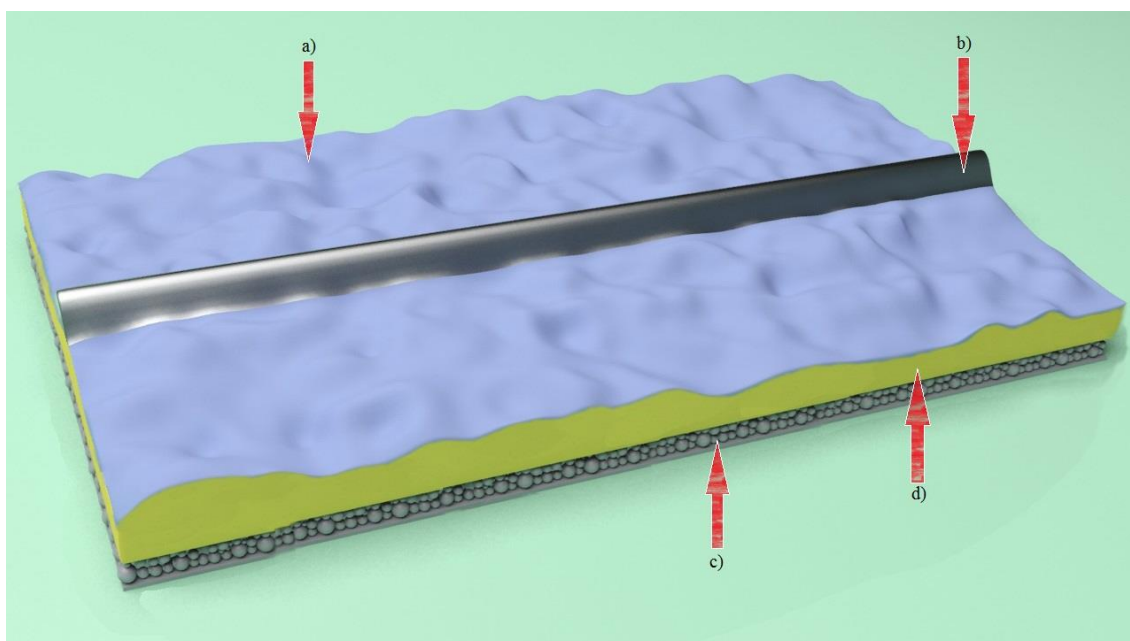
Obrázek 24 Vymodelovaný solární článek

Obrázek č. 24 znázorňuje 3D model kompletního solárního článku s kontaktními vodiči.

Na obrázku č. 25 se dají pozorovat následky vznikající vnitřním pnutím v solárním článku, na levé straně je mikroskopický snímek a na pravé straně se nachází vymodelovaná oblast s vnitřním pnutím solárního článku.

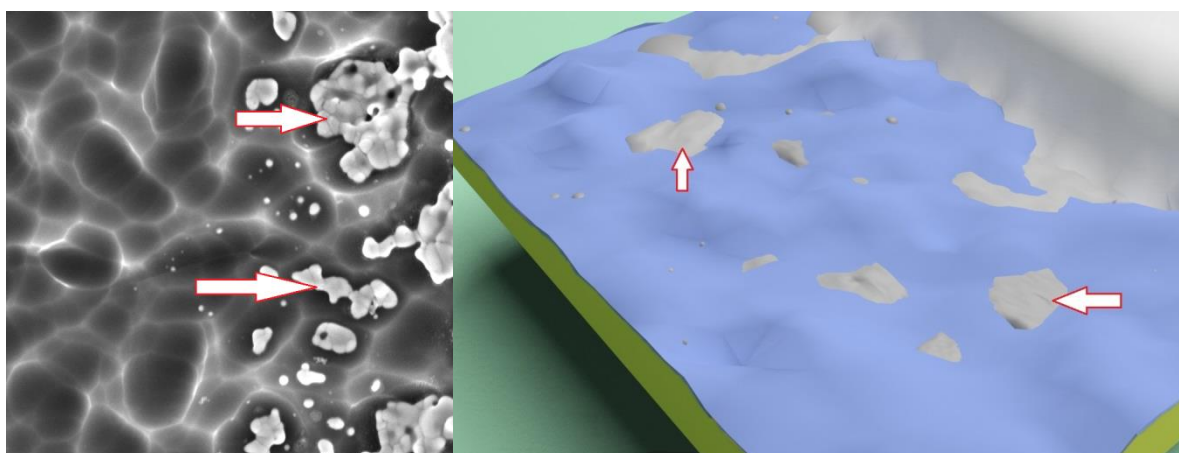


Obrázek 25 Důsledek pnutí materiálu a jeho 3D model



Obrázek 26 Model průřezu solárního článku

Obrázek č. 26 znázorňuje řez solárním článkem, na modelu můžeme pozorovat několik bodů. Bod a) poukazuje na antireflexní vrstvu, b) je stříbrná kontaktní plocha, c) značí křemíkovou vrstvu obsahující substrát P a emitorovou vrstvou N, d) zadní metalizace solárního článku.



Obrázek 27 Rozstřík metalizace

Na obrázku č. 27 je za pomoci šipek ukázáno na rozstřík metalizace, vzniká při vytváření kontaktů. V levé části je snímek z elektronového mikroskopu a na pravé straně je model tohoto rozstříku.

9 Závěr

V první části této bakalářské práce je popsána struktura a princip fungování fotovoltaického článku, následně je definována výroba článku od zpracování surového křemíku přes vytažený ingot a jeho nařezání, až k finálnímu výrobku. Dále je zpracován generační vývoj článků, který je doplněn o klasické materiály, ze kterých se články vyrábí, i o materiály méně tradiční, ale s nadějnou budoucností. Následně jsou charakterizovány defekty. Tyto defekty mohou vznikat při výrobě solárních článků nebo při špatném zacházení s nimi. Aby bylo možné tyto defekty odhalit, je zapotřebí diagnostických metod, těmto metodám se v práci také věnuji.

Druhá část práce se zabývá praktickou analýzou solárních článků. V prvním bodě byly vybrané články změřeny metodou elektroluminiscence, za pomoci této metody bylo ve vybraných vzorcích odhaleno několik defektů. Ze změřených 15 vzorků byly nalezeny defekty u 6, z toho plyne, že u 40% zkoumaných článků byla nalezena vada. Elektroluminiscenční metoda byla využita pro její nenáročnost a rychlost. Druhým bodem praktické části byla analýza solárních článků za pomoci elektronového mikroskopu. Kvůli absenci dostupnosti vhodného detektoru (např. EBIC) nebylo možné prozkoumat vnitřní strukturu solárního článku, proto bylo nutné místo toho využít základních detektorů (SE a BSE), pro prozkoumání povrchu článku, povrchových defektů a pro řez solárním článkem. Posledním bodem bylo vytvoření 3D modelů, ze snímků pořízených elektronovým mikroskopem, za pomoci programu 3d Studio Max.

Seznam obrázků

OBRÁZEK 1 STRUKTURA SOLÁRNÍHO ČLÁNKU[18]	10
OBRÁZEK 2 ŠÍŘKA ZAKÁZANÝCH PÁSŮ V EV VYBRANÝCH POLOVODIČŮ A VLNOVÁ DÉLKA ODPOVÍDAJÍCÍM TĚMTO ENERGIÍM[13]	11
OBRÁZEK 3 SCHEMATICKE ZNÁZORNĚNÍ POSTUPU VÝROBY KŘEMÍKU[3]	13
OBRÁZEK 4 ZNÁZORNĚNÍ CZOCHRALSKÉHO PECE A VÝSLEDNÉHO INGOTU[19]	14
OBRÁZEK 5 UKÁZKA MONOKRYSTALICKÉHO ČLÁNKU	17
OBRÁZEK 6 UKÁZKA POLYKRISTALICKÉHO ČLÁNKU.....	18
OBRÁZEK 7 VÍROVÝ DEFEKT	21
OBRÁZEK 8 NEHOMOGENITA DIFÚZNÍ VRSTVY[11]	22
OBRÁZEK 9 VNITŘNÍ PNUTÍ[11].....	22
OBRÁZEK 10 MECHANICKÉ POŠKRÁBÁNÍ[11]	23
OBRÁZEK 11 PRACHOVÉ ČÁSTICE[11].....	23
OBRÁZEK 12 ŠPATNÉ NAKONTAKTOVÁNÍ[11].....	24
OBRÁZEK 13 A) VAKANCE, B) VLASTNÍ INTRISTICIÁLNÍ ATOM, C) HRANOVÁ DISLOKACE, D) INTERSTICIÁLNÍ PŘÍMĚSOVÝ ATOM, E) SUBSTITUČNÍ ATOM S MENŠÍM POLOMĚREM, F) SUBSTITUČNÍ ATOM S VĚTŠÍM POLOMĚREM	25
OBRÁZEK 14 VÝSLEDNÝ OBRAZ ELEKTROLUMINISCENCE	26
OBRÁZEK 15 VYZAŘOVÁNÍ MIKROPLAZMY[15]	27
OBRÁZEK 16 VÝSLEDNÝ OBRAZ ELEKTRONOVÉHO MIKROSKOPU ZA POUŽÍ A) SE DETEKTORU, B) EBIC DETEKTORU[2].....	28
OBRÁZEK 17 VÝSLEDNÝ OBRAZ METODY LBIC[20].....	28
OBRÁZEK 18 SCHÉMATICKE ZAPOJENÍ PRO MĚŘENÍ METODOU ELEKTROLUMINISCENCE	30
OBRÁZEK 19 VZOREK 3801 SiD 2	31
OBRÁZEK 20 MĚŘÍCÍ STANOVISŤE[21]	32
OBRÁZEK 21 PNUTÍ MATERIÁLU, SE A BSE DETEKTOR, ZVĚTŠENÍ 5000X	33
OBRÁZEK 22 PRŮŘEZ ČLÁNKEM, BSE DETEKTOR, ZVĚTŠENÍ 500X.....	34
OBRÁZEK 23 UŽIVATELSKÉ ROZHRAŇÍ PROGRAMU 3DS MAX.....	35
OBRÁZEK 24 VYMODELOVANÝ SOLÁRNÍ ČLÁNEK	35
OBRÁZEK 25 DŮSLEDEK PNUTÍ MATERIÁLU A JEHO 3D MODEL.....	36
OBRÁZEK 26 MODEL PRŮŘEZU SOLÁRNÍHO ČLÁNKU	36
OBRÁZEK 27 ROZSTŘÍK METALIZACE	37

Literatura

- [1] Fotovoltaika pro každého. Czech RE Agency [online]. © 2003 - 2009 [cit. 2012-12-05]. Dostupné z: <http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/fotovoltaika>
- [2] Solar Energy Materials and Solar Cells: Distinguishing morphological and electrical defects in polycrystalline silicon solar cells using scanning electron acoustic microscopy and electron beam induced current [online]. 2632–2637 [cit. 2013-05-30]. Dostupné z:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024811002790>
- [3] LIBRA, Martin a Vladislav POULEK. *Fyzikální podstata fotovoltaické přeměny solární energie*. 2005, č. 1, s. 32-36.
Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/40646.pdf>
- [4] BOUŠEK, Jaroslav. SOLÁRNÍ FOTOVOLTAIKA. BRNO: VUT. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/VIT/images/pdf/aktuality/bousek-fotovoltaika.pdf>
- [5] VANĚK, Jiří. Aktuální trendy diagnostických metod FV článků pro maximalizaci délky životnosti panelů. In: [online]. 2011 [cit. 2012-12-05]. Dostupné z: <http://www.cemc.cz/OZE2011/116.pdf>
- [6] Současné trendy v oblasti fotovoltaických článků a modulů. BENDA, Vítězslav. Imaterialy [online]. 2010 [cit. 2012-12-05].
Dostupné z: <http://www.imaterialy.cz/Technologie/Soucasne-trendy-vnbspoblasti-fotovoltaickych-clanku-a-modulu.html>
- [7] OOTHMAN, Jessika a Scott ALDOUS. How Solar Cells Work. In: How Stuff Works [online]. [cit. 2013-05-30]. Dostupné z:
<http://science.howstuffworks.com/environmental/energy/solar-cell1.htm>
- [8] KUSALA, J. Solární energie [online]. 2006 [cit. 2012-12-05]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/f8.htm>.
- [9] BERTOLLI, Michael. Solar Cell Materials [online]. Tennessee, 2008 [cit. 2013-05-30]. Dostupné z:
http://scs.phys.utk.edu/~dagotto/condensed/HW1_2008/BertolliSolarCellMaterials.pdf. University of Tennessee.
- [10] Solární články z krystalického křemíku: základní technologie současné fotovoltaiky. BENDA, Vítězslav. Technická Zařízení Budov [online]. 2006 [cit.

- 2012-12-05]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/3553-solarni-clanky-z-krystalickeho-kremiku-zakladni-technologie-soucasne-fotovoltaiky>
- [11] JANDOVÁ, K. Diagnostické metody plošného rozložení defektů solárních článků. Brno, 2008. 91 s. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
 - [12] JIRÁK, J., R. AUTRATA a K. LIEDERMANN. Materiály a technická dokumentace: Materiály v elektrotechnice. Brno: VUT, Fakulta Elektrotechniky a komunikačních technologií, 128 s.
 - [13] THUBENÁK, Josef. LED a laser. In: [online]. [cit. 2013-05-30]. Dostupné z: <http://vnuf.cz/sbornik/prispevky/05-13-Hubenak.html>
 - [14] BREITENSTEIN, O., J. BAUER a M. KITTLER. EBIC and Luminescence Studies of Defects in Solar Cells. In: [online]. [cit. 2013-05-30]. Dostupné z: http://www.mpi-halle.de/mpi/publi/pdf/8257_08.pdf
 - [15] Diagnostické metody fotovoltaiických článků. In: [online]. 2010 [cit. 2013-05-30]. Dostupné z: <http://www.asb-portal.cz/tzb/fotovoltaika/diagnosticke-metody-fotovoltaicky-ch-clanku-2100.html>
 - [16] FAN, T.W., J.J. QIAN a J. WU. Tentative analysis of Swirl defects in silicon crystals. [online]. 2000, s. 276-282 [cit. 2013-05-30]. Dostupné z: <http://ir.semi.ac.cn/bitstream/172111/12578/1/1360.pdf>
 - [17] LORENC, M., J. ŠIK a L. VÁLEK. TECHNOLOGIE RŮSTU MONOKRYSTALŮ KŘEMÍKU CZOCHRALSKIHO METODOU. In: [online]. [cit. 2013-05-30]. Dostupné z: http://silicon.euweb.cz/LORENC_CZSi.pdf
 - [18] "BONEFARITA". In: BONEFARITA [online]. [cit. 2013-05-30]. Dostupné z: <http://www.bonefarita.cz/obnovitelne-zdroje-energie.html>
 - [19] O'MAR, William C., Robert B. HERRING a Lee P. HUNT. HANDBOOK OF SEMICONDUCTOR SILICON TECHNOLOGY. New Jersey: Noyes Publications, 1990. ISBN 0-8155-1237-6.
 - [20] KREBS, Frederik C., Roar SØNDERGAARD a Mikkel JØRGENSEN. Solar Energy Materials and Solar Cells: Printed metal back electrodes for R2R fabricated polymer solar cells studied using the LBIC technique. In: [online]. 2011 [cit. 2013-06-03]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024810006501>
 - [21] Laboratoře elektronové mikroskopie: Aquasem II. Ústav přístrojové techniky AV ČR, v.v.i. [online]. [cit. 2012-12-05]. Dostupné z: <http://www.isibrno.cz/lem/aquasem.html>